

07

## **Влияние насыщения усиления на ватт-амперную характеристику полупроводникового лазера**

© Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург  
E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 февраля 2012 г.

Показано, что при исключении температурных эффектов даже незначительный загиб ватт-амперной характеристики полупроводникового лазера вследствие насыщения усиления свидетельствует о многократном повышении концентрации носителей, необходимой для поддержания генерации, т.е. о значительном повышении „эффективного“ порога генерации.

В настоящее время полупроводниковые лазеры стремительно расширяют круг своих применений как в традиционных для них областях науки и техники, включающих запись, хранение и передачу информации, накачку оптических усилителей и твердотельных лазеров, так и в относительно новых приложениях в фотомедицине и биофотонике, включающих, в частности, фотоэпиляцию, лазерную липоксацию и генерацию белков теплового шока. К сожалению, диктуемая новыми применениями необходимость повышения мощности их излучения сталкивается с трудностями, связанными с насыщением ватт-амперной характеристики, обусловленными насыщением усиления, перегревом активной области и нелинейными эффектами не только в непрерывном, но и в импульсном режиме. Особенно актуальным является изучение насыщения усиления в полупроводниковых лазерах при накачке сверхкороткими импульсами тока, т.е. в условиях, исключающих проявление эффектов, связанных с перегревом активной области.

При этих условиях система скоростных уравнений, описывающая работу лазера, может быть записана в довольно простом виде [1–3], учитывающем лишь влияние насыщения усиления на концентрацию носителей заряда и плотность фотонов в резонаторе и не принимающем

во внимание температурные эффекты:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - A(N - N_{ir})S(1 - \varepsilon S) - \frac{N}{\tau}, \\ \frac{dS}{dt} = \Gamma A(N - N_{ir})S(1 - \varepsilon S) + \frac{\Gamma\beta N}{\tau} - \frac{S}{\tau_p}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $S$  — плотность фотонов в резонаторе,  $N$  — концентрация носителей заряда,  $I$  — эффективный ток накачки с учетом внутренней квантовой эффективности,  $V$  — объем активной области,  $N_{ir}$  — концентрация прозрачности,  $\tau$  — спонтанное время жизни носителей,  $\tau_p$  — время жизни фотонов в резонаторе,  $\Gamma$  — коэффициент оптического ограничения,  $\beta$  — фактор спонтанного излучения,  $A$  — линейный коэффициент усиления,  $e$  — заряд электрона,  $\varepsilon$  — коэффициент насыщения усиления.

Вообще говоря, термин „насыщение усиления“ был введен Яри-вом [4] для описания насыщения мощности излучения в атомных лазерных системах при увеличении интенсивности накачки. При расширении применения этого формализма, помимо (1), использовались еще две формы его математического описания.

1. Описание насыщения усиления при помощи плотности фотонов/мощности насыщения  $S_s$ , достижение которой соответствует двукратному падению усиления за счет введения множителя  $(1 + S/S_s)^{-1}$ . Очевидно, что замена  $S_s \rightarrow \varepsilon^{-1}$  при  $S/S_s \ll 1$  не только приводит данное выражение к виду (1), но и наглядно демонстрирует физический смысл коэффициента насыщения усиления  $\varepsilon$ .

2. Введение нелинейного усиления  $-A_s(N - N_{irs})S^2/S_s$  для описания его насыщения. При замене  $A_s/S_s \rightarrow \varepsilon$  и равенстве  $N_{irs} = N_{ir}$  данное выражение также приходит к виду (1), однако его недостатком является необходимость применения коэффициентов  $A_s$  и  $N_{irs}$ , не имеющих явного физического смысла.

Следует отметить, что насыщение усиления может быть также связано с увеличением влияния оже-процессов на работу полупроводникового лазера при высоких уровнях накачки [5] и соответствующим увеличением потерь, ведущим к повышению концентрации носителей заряда, необходимой для поддержания генерации. При этом учет влияния оже-процессов через коэффициент насыщения усиления представляется наиболее обоснованным по сравнению с другими подходами.

Несмотря на то что система (1) является нелинейной, она допускает квазианалитическое решение:

$$\begin{cases} N = N_{th} + \frac{1}{\Gamma A \tau_p} \frac{\varepsilon S}{1 - \varepsilon S}, & N_{th} = N_{tr} + \frac{1}{\Gamma A \tau_p}, \\ S = \frac{\Gamma \tau_p}{eV} \left( I - I_{th} - \frac{eV}{\Gamma A \tau \tau_p} \frac{\varepsilon S}{1 - \varepsilon S} \right), & I_{th} = \frac{N_{th} eV}{\tau}, \end{cases} \quad (2)$$

которое, очевидно, приходит к классическому виду токовой зависимости концентрации носителей заряда и плотности фотонов в резонаторе при  $\varepsilon S \rightarrow 0$ :

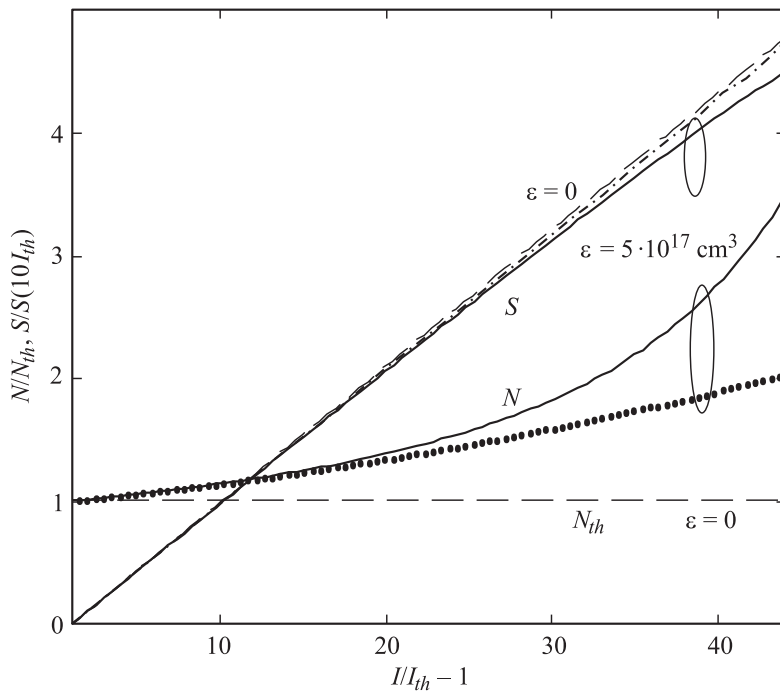
$$\begin{cases} N = N_{th} = N_{tr} + \frac{1}{\Gamma A \tau_p}, \\ S = \frac{\Gamma \tau_p}{eV} (I - I_{th}), & I_{th} = \frac{N_{th} eV}{\tau}. \end{cases} \quad (3)$$

Из системы (2) легко может быть получено аналитическое выражение, которое тем не менее имеет весьма громоздкую форму и поэтому удобно ограничиться его разложением, наглядно демонстрирующим быстрый рост концентрации носителей заряда с током накачки вследствие насыщения усиления:

$$\begin{cases} N = N_{th} + \frac{\tau}{eV} \frac{\varepsilon}{A\tau + \varepsilon} (I - I_{th}) + \frac{\Gamma A^2 \tau \tau_p}{A\tau + \varepsilon} \left[ \frac{\tau}{eV} \frac{\varepsilon}{A\tau + \varepsilon} (I - I_{th}) \right]^2, \\ S = \frac{\Gamma \tau_p}{eV} \frac{A\tau}{A\tau + \varepsilon} \left( I - I_{th} - \frac{\Gamma A \tau \tau_p}{eV} \left[ \frac{\varepsilon}{A\tau + \varepsilon} (I - I_{th}) \right]^2 \right). \end{cases} \quad (4)$$

Влияние насыщения усиления на концентрацию носителей заряда и плотность фотонов в резонаторе проиллюстрировано на рисунке, где хорошо видно, что даже незначительное отклонение ватт-амперной характеристики от линейной зависимости вследствие насыщения усиления свидетельствует о многократном повышении „эффективного“ порога генерации. Приближенное решение (4), как видно из рисунка, несмотря на наличие квадратичного члена, дает заниженную оценку концентрации носителей заряда в активной области при значительном насыщении усиления.

Система (1) может быть записана с учетом особенностей, присущих лазерам на основе квантово-размерных гетероструктур, в частности, факторов заполнения уровней размерного квантования, необходимых для адекватного описания лазеров на основе квантовых точек. Однако



Зависимость нормированной концентрации носителей заряда и нормированной плотности фотонов в резонаторе от нормированного тока накачки при  $\varepsilon = 0$  (пунктирные линии) и  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-17}$  см. Сплошные линии показывают точное решение (2), штрихпунктирные — приближенное (4). В расчетах использованы параметры, типичные для современных полупроводниковых лазеров [5,6].

такая запись исключает возможность аналитического решения, в связи с чем в данной работе приведен анализ влияния насыщения усиления на концентрацию носителей в объемной активной области. Для лазеров с квантово-размерной активной областью, в первую очередь для лазеров на основе квантовых ям, численное моделирование дает качественно сходные результаты.

Таким образом, в данной работе на основе анализа скоростных уравнений показано, что даже незначительное отклонение ватт-амперной характеристики от линейной зависимости вследствие насыщения усиления при исключении температурных эффектов свидетельствует о многократ-

ном повышении концентрации носителей, необходимой для поддержания генерации, т. е. о значительном повышении „эффективного“ порога генерации. Эти выводы согласуются с результатами работ [7,8], где был показан нетемпературный загиб ватт-амперной характеристики при накачке полупроводниковых лазеров с квантово-размерной областью короткими импульсами тока. Наблюдаемое в этих работах переключение генерации между квантовыми состояниями также говорит о значительном росте концентрации носителей заряда в активной области. Сделанные нами оценки указывают на ускорение проявления эффектов, связанных с насыщением усиления, при уменьшении объема активной области полупроводникового лазера. Для экспериментального подтверждения данного предположения нами были проведены комплексные исследования характеристик полупроводниковых лазеров с различным количеством слоев квантовых точек в активной области. Эксперименты показали более раннее насыщение ватт-амперной характеристики у лазеров с меньшим объемом активной области и, напротив, уменьшение влияния насыщения усиления при увеличении объема активной области за счет увеличения количества квантовых слоев.

Данная работа поддержана программой президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“, грантами Правительства Санкт-Петербурга и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры“ 2009–2013 гг. (государственные контракты 14.740.11.0066 и 14.740.11.1413), а также грантом президента России МК-1937.2011.2.

## Список литературы

- [1] Channin D.J. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50 (6). P. 3858–3860.
- [2] Bowers J.E., Hemenway B.R., Gnauck A.H., Wilt D.P. // IEEE J. Quant. El. 1986. V. 22(6). P. 833–844.
- [3] Zhao B., Chen T.R., Yariv A. // IEEE J. Quant. El. 1992. V. 28(6). P. 1479–1486.
- [4] Yariv A. Quantum Electronics / 3<sup>rd</sup> ed. Wiley; New York, 1988. P. 176.
- [5] Lyutetskii A.V., Borshchev K.S., Pikhtin N.A., Slipchenko S.O., Sokolova Z.N., Tarasov I.S. // Semiconductors. 2008. V. 42. N 1. P. 104–111.
- [6] Sokolovskii G.S., Deryagin A.G., Kunchinskii V.I. // Tech. Phys. Lett. 1997. V. 23(5). P. 373–376.
- [7] Sokolovskii G.S., Vinokurov D.A., Deryagin A.G., Dudelev V.V., Kuchinskii V.I., Losev S.N., Lyutetskiy A.V., Pikhtin N.A., Slipchenko S.O., Sokolova Z.N., Tarasov I.S. // Tech. Phys. Lett. 2008. V. 34 (8). P. 708–710.

- [8] *Sokolovskii G.S., Cataluna M.A., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I., Novikov I.I., Maximov M.V., Zhukov A.E., Ustinov V.M., Sibbett W., Rafailov E.U.* // *Tech. Phys. Lett.* 2007. V. 33 (1). P. 4–7.